

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016

Jan Hrdlička



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**PSEUDODIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY**

PSEUDO-DIFFERENTIAL FREQUENCY FILTERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Hrdlička

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

**BRNO 2016**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Jan Hrdlička

**ID:** 146014

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Pseudodiferenční kmitočtové filtry

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě současných návrhových metod pseudodiferenčních kmitočtových filtrů navrhnete vlastní řešení kmitočtových filtrů pracujících v napěťovém a proudovém režimu. Navrhnete funkční pseudodiferenční struktury a vyhodnotíte je z pohledu zkreslení zpracovávaného signálu, potlačení souhlasného signálu (CMRR), potlačení napájecího napětí (PSRR), výkonové spotřeby a dále pak náročnosti na vlastní realizaci takových kmitočtových filtrů. Ze simulovaných zapojení zvolte nejvhodnější řešení a podrobně jej experimentálním měřením.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CHAN, K.: Design of Differential Filters for High-Speed Signal Chains, Application report, Texas Instruments, SLWA053B, 8 pages, 2010.

[2] JEŘÁBEK, J., KOTON, J., ŠOTNER, R. VRBA, K.: Adjustable band-pass filter with current active elements: two fully-differential and single-ended solutions. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, roč. 74, č. 1, s. 129-139, 2013.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 1.6.2016

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá návrhem pseudodiferenčních kmitočtových filtrů. Úvod práce se zabývá popisem a vlastnostmi kmitočtových filtrů. Dále jsou popsány aktivní prvky, především diferenční proudové konvejory. Hlavním cílem práce je návrh pseudodiferenčních kmitočtových filtrů pomocí transformace nediferenčních struktur na struktury diferenční pomocí diferenčních proudových konvektorů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Kmitočtový filtr, psoudodiferenční kmitočtový filtr, horní propust, dolní propust, pásmová propust, pásmová zádrž, fázovací článek, obecný proudový konvektor, univerzální proudový konvektor, diferenční proudový konvektor, diferenční rozdílový proudový konvektor

## **ABSTRACT**

This Bachelor thesis deals with the pseudo differential frequency filters. Introduction The thesis describes the characteristics and frequency filters. The following describes the active elements, especially the differential current conveyors. The main objective is to design pseudo differential frequency filters using the transformation non-differential structures using differential structure differential current conveyors.

## **KEYWORDS**

Frequency filter, pseudo differential frequency filter, high pass, low pass, band pass, band stop, phasing article, general current conveyor, universal current conveyor, differential current conveyor, differential difference current conveyor

HRDLIČKA, Jan *Pseudodiferenční kmitočtové filtry*: bakalářská práce. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 49 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Pseudodiferenční kmitočtové filtry“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

BRNO .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu panu doc. Ing. JAROSLAV KOTON, Ph.D. za odborné vedení při mé práci na semestrálním projektu. Také za cenné rady, věcné připomínky a konzultace během doby psaní této práce

BRNO .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

BRNO .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

Úvod	11
<b>1 KMITOČTOVÉ FILTRY</b>	<b>12</b>
1.1 Vlastnosti kmitočtových filtrů . . . . .	13
1.2 Rozdělení filtrů . . . . .	13
1.2.1 Filtr typu horní propust . . . . .	14
1.2.2 Filtr typu dolní propust . . . . .	15
1.2.3 Filtr typu pásmová propust . . . . .	15
1.2.4 Filtr typu pásmová zádrž . . . . .	15
1.2.5 Filtr typu fázovací členek . . . . .	16
1.3 Diferenční filtry . . . . .	16
1.4 Návrh diferenčních struktur . . . . .	17
1.4.1 Transformace podélných struktur . . . . .	17
1.4.2 Transformace příčných struktur . . . . .	18
<b>2 AKTIVNÍ PROUDOVÉ PRVKY</b>	<b>19</b>
2.1 Obecný proudový konvektor GCC . . . . .	19
2.2 Univerzální proudový konvektor UCC . . . . .	20
2.3 Diferenční proudový konvektor DVCC . . . . .	20
2.4 Diferenční rozdílový proudový konvektor DDCC . . . . .	21
<b>3 FILTRAČNÍ STRUKTURY</b>	<b>23</b>
3.1 Transformace nesymetrických struktur na symetrické s aktivními prvky . . . . .	23
3.2 Transformace nesymetrických vstupů na symetrické v napěťovém režimu . . . . .	24
3.3 Transformace nesymetrických výstupů na symetrické v napěťovém režimu . . . . .	25
3.4 Transformace nesymetrických vstupů na symetrické v proudovém režimu . . . . .	27
3.5 Transformace nesymetrických výstupů na symetrické v proudovém režimu . . . . .	28
<b>4 TRANSFORMACE NESYMETRICKÝCH FILTRŮ NA SYMETRICKÉ</b>	<b>31</b>
4.1 Nesymetrické zapojení . . . . .	31
4.2 Realizace symetrického zapojení . . . . .	32
4.2.1 Modifikace zapojení - filtr typu dolní propust 1 . . . . .	33



4.2.2	Modifikace zapojení - filtr typu dolní propust 2 . . . . .	34
<b>5</b>	<b>SIMULACE</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ</b>	<b>37</b>
6.1	Převodník napětí na proud $U/I$ . . . . .	37
6.2	Převodník napětí na proud $I/U$ . . . . .	38
6.3	Měření . . . . .	39
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>42</b>
	<b>Literatura</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>44</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Lineární Dvojbran . . . . .	13
1.2	Ideální charakteristiky kmitočtových filtrů DP, HP, PZ, PP . . . . .	14
1.3	Pravidla transformace podélných rezistorů a kondenzátorů na diferenční strukturu . . . . .	17
1.4	Pravidla transformace příčných rezistorů a kondenzátorů na diferenční strukturu . . . . .	18
2.1	Schematická značka obecného proudového konveju GCC . . . . .	19
2.2	Schematická značka Univerzálního proudového konveju UCC . . . . .	20
2.3	Schematická značka Diferenčního proudového konveju DVCC . . . . .	21
2.4	Schematická značka Diferenčního rozdílového proudového konveju DVCC . . . . .	22
3.1	a) Klasické zapojení OZ, b) Diferenční zapojení OZ . . . . .	23
3.2	Nesymetrická struktura vstupu s konvejorem CCII . . . . .	24
3.3	Symetrická struktura vstupu s konvejorem DDCC . . . . .	24
3.4	Nesymetrická struktura výstupu s konvejorem CCII . . . . .	25
3.5	Symetrická struktura výstupu s konvejorem CCII a invertorem . . . . .	26
3.6	Symetrická struktura výstupu s konvejorem DDCC . . . . .	26
3.7	Nesymetrický vstup v proudovém režimu . . . . .	27
3.8	Symetrický vstup v proudovém režimu . . . . .	27
3.9	Symetrický vstup v proudovém režimu s konvejory . . . . .	28
3.10	Symetrický vstup v proudovém režimu kombinovaná možnost . . . . .	28
3.11	Nesymetrický výstup v proudovém režimu . . . . .	29
3.12	Symetrický výstup v proudovém režimu . . . . .	29
3.13	Symetrický výstup v proudovém režimu se dvěma konvejory . . . . .	30
4.1	Multifunkční kmitočtový filtr 2. řádu s UCC . . . . .	31
4.2	Realizace diferenčního zapojení s filtrem typu dolní propust . . . . .	33
4.3	Realizace diferenčního zapojení s filtrem typu dolní propust . . . . .	34
4.4	Přenosová charakteristika filtru DP . . . . .	35
5.1	Přenosová charakteristika filtru DP . . . . .	36
6.1	Převodník $U/Idif$ . . . . .	38
6.2	Převodník $U/Idif$ . . . . .	38
6.3	Převodník $Idif/U$ . . . . .	39
6.4	Převodník $Idif/U$ . . . . .	39
6.5	Průběh potlačení souhlasného signálu . . . . .	40
6.6	Průběh přenosové charakteristiky DP . . . . .	41
6.7	Průběh potlačení souhlasného signálu . . . . .	41
1	Návrh desky plošných spojů - pohled ze zdola . . . . .	46

2	Foto desky kmitočtového filtru . . . . .	46
3	Návrh desky plošných spojů - součástky . . . . .	47
4	Návrh desky plošných spojů - pohled ze shora . . . . .	47
5	Návrh desky plošných spojů - pohled ze shora . . . . .	48
6	Návrh desky plošných spojů - součástky . . . . .	48
7	Výsledek dolní propusti z analyzátoru . . . . .	49
8	Výsledek dolní propusti z analyzátoru s potlačením souhlasného signálu	49

# ÚVOD

Práce se zabývá problematikou transformace nesymetrických struktur na struktury symetrické návrhu pseudodiferenčních filtrů v proudovém a napěťovém režimu. V elektrotechnice se dost často setkáme s kmitočtovými filtry. Aktivní kmitočtový filtr je jedním z nejvíce používaných obvodů pro zpracování signálu.

Diferenční kmitočtové filtry mají několik výhod a nevýhod. Mezi ty kladné stránky patří větší potlačení souhlasného signálu, větší dynamický rozsah a snížení harmonického zkreslení. Transformace z nesymetrických struktur na struktury symetrické umožňuje změnu vstupních a výstupních svorek, aniž by došlo ke změně vnitřní logiky obvodu. Nevýhodou diferenčních filtrů je, že je nutné použít složitější aktivní prvky a tedy nám budou zabírat větší místo na desce a také obsahují větší množství pasivních součástek tedy budou cenově i energeticky náročnější.

První kapitola se zabývá vlastnostmi kmitočtových filtrů. Jaké kmitočtové filtry máme tedy jejich rozdělení na horní propust, dolní propust, pásmovou propust, pásmovou zádrž a fázovací článek. Jsou zde také popsány diferenční filtry a návrh diferenčních filtrů pasivních prvků.

Další kapitola je věnována aktivním proudovým prvkům. Především se tato část práce bude zabývat proudovými konvejory. Konkrétně je zde popsán obecný proudový konvektor, univerzální proudový konvektor, diferenční proudový konvektor a diferenční rozdílový proudový konvektor.

Ve 4. kapitole řeším hlavní téma a to návrh diferenčního kmitočtového filtru. Tedy vezmu nesymetrické nediferenční zapojení, které pracuje v proudovém režimu a pomocí transformací ho navrhnu jako symetrické diferenční zapojení. Z toho vznikli tři modifikace zapojení, které byli následně odsimulovány.

# 1 KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody, používané v mnoha oblastech elektrotechniky a elektroniky [1]. Jejich úkolem je výběr kmitočtových složek procházejícího signálu dle jejich kmitočtu. Některé složky propouští bez útlumu, tato oblast se nazývá propustné pásmo, jiné potlačují a to je nepropustné pásmo.

Mají velkou škálu využití v mnoha obvodech. Patří mezi základní stavební bloky pro zpracování signálů. V radiotechnice je časté použití pásmových propustí pro výběr přijímaných signálů jako vstupní obvody přijímačů. Dolních a horních propustí jako výhybek pro rozdělení kmitočtových pásem v anténních obvodech a předzesilovačích [1].

Obecně můžeme rozlišovat mezi aktivními nebo pasivními obvodovými strukturami. Nejčastěji se kmitočtové filtry realizují pomocí pasivních součástek, nejvyužívanějšími jsou kondenzátory a rezistory. Tyto prvky jsou levnou a dostupnou variantou a jejich výhodou je jednoduchost, bez potřeby externího napájení. Využití pasivních filtrů je však omezené. Používají se, pokud se nekladou vysoké nároky na přesnost aproximace přenosové funkce.

V dnešní době je, ale snahou pasivní filtry nahradit filtry aktivními, (nejčastěji jsou to napěťové nebo proudové konvejory, operační zesilovače ) z důvodu snazší přeladitelnosti nebo nastavitelnosti. Základ aktivního filtru je tvořen aktivním prvkem, který je doplněn pasivními součástkami. Nevýhodou aktivních filtrů je, že potřebují externí napájení, ale dnešní technologie požadavky na napájení minimalizuje.

## 1.1 Vlastnosti kmitočtových filtrů

Představíme-li si filtr jako lineární dvojbran dle [1], můžeme ho vidět na Obr.(1.1), popsat a vyjádřit jeho chování můžeme pomocí těchto přenosových vztahů:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, I_2 = 0, \quad (1.1)$$

$$K_i = \frac{I_2}{I_1}, U_2 = 0, \quad (1.2)$$



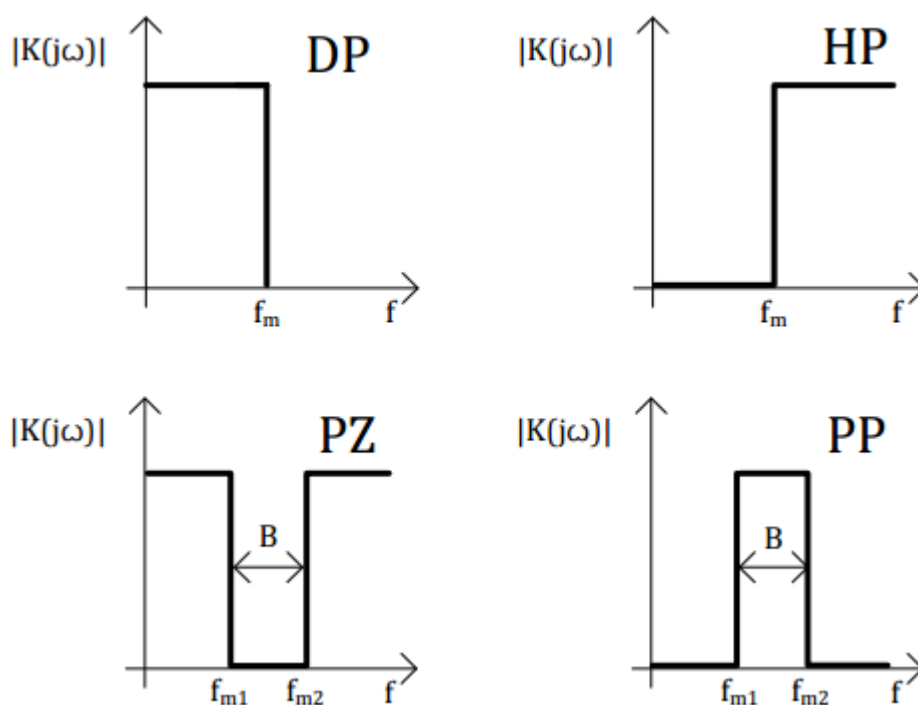
Obr. 1.1: Lineární Dvojbran

Rovnice (1.1), (1.2) pro přenos napětí a proudu platí pro obvody lineární i nelineární. Pokud u lineárních obvodů vstupuje do dvojbranu napětí s kmitočtem  $f$ , tak na výstupu je signál opět s kmitočtem  $f$ , další spektrální složky signál neobsahuje. Ale mění se závislost propustného nebo nepropustného pásma filtru a kmitočtu  $f$ , pokud změníme amplitudy a fáze.

## 1.2 Rozdělení filtrů

Každé filtry můžeme dělit z hlediska zpracování signálu na diferenční a nediferenční. Dále podle toho jaké vlastnosti mají jejich elektronické součástky, ze kterých je filtr sestaven a to na filtry aktivní nebo pasivní. A dále podle zpracování signálů, z hlediska jejich propustnosti na selektivní filtry.

Filtry pasivní nebo aktivní dělíme podle toho jakým způsobem propouští signál na dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmová propust (PP), pásmová zadrž (PZ), fázovací článek (FČ). Každý z jednotlivých filtrů má  $f_m$  mezní kmitočet, který je specifický pro každý filtr, od tohoto kmitočtu filtr začíná potlačovat signál, propouštět signál, nebo vybírat. Na obr. 1.2 vidíme ideální charakteristiky podle [2] jednotlivých kmitočtových filtrů.



Obr. 1.2: Ideální charakteristiky kmitočtových filtrů DP, HP, PZ, PP

### 1.2.1 Filtr typu horní propust

Filtr horní propust (HP) v angličtině psáno High-Past filter (HP) [2], který propouští složky signálu o kmitočtech vyšších než je mezní kmitočet  $f_m$  [1] a nižší složky potlačuje. Řád filtru určuje strmost, podle toho jak se mění přenosová funkce filtru na hranici propustnosti a nepropustnosti. Tento filtr se využívá v audio technice, jako výhybka pro vysoké frekvence, pokud používáme vícepásmové reproduktory. Nebo jen například pro odrušení nízkofrekvenčního brumu ve vysokofrekvenčních obvodech.

Přenosová funkce filtru HP 2.řádu:

$$K(p) = \frac{p^2}{p^2 + p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}. \quad (1.3)$$

kde symbol  $\omega_0 = 2\pi f_0$  a  $f_0$  je mezní kmitočet,  $K(p)$  je přenos napětí,  $p$  je komplexní kmitočet a rovná se  $j\omega$ .  $Q$  je činitel jakosti.

### 1.2.2 Filtr typu dolní propust

Filtr dolní propust (DP) v angličtině psáno Low-Pass filter (LP) [2], propouští složky signálu s kmitočty nižšími než mezní kmitočet  $f_m[1]$ , kdy modulová charakteristika signálu poklesne o 3dB a vyšší signály potlačuje.

Filtr se používá především v audio technice. Dále se tento filtr využívá ve stejnosměrných a nízkofrekvenčních elektronických obvodech pro zpracování signálu pro eliminaci nežádoucího šumu na vyšších frekvencích.

Přenosová funkce filtru DP 2.řádu:

$$K(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + p\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}. \quad (1.4)$$

### 1.2.3 Filtr typu pásmová propust

Filtr pásmová propust (PP) v angličtině psáno Band-Pass filter (BP) je filtr, který na rozdíl od horní a dolní propusti, které mají mezní kmitočet (tj. pokles přenosu o 3dB), kde až po tuto frekvenci filtr propouští všechny nižší kmitočty (dolní propust) a všechny vyšší kmitočty (horní propust), propouští pouze pásmo určené dvěma mezními frekvencemi  $f_{m1}$  a  $f_{m2}$ . Ostatní kmitočty potlačuje [1]. Pásmové filtry se používají v první řadě v bezdrátových vysílačů a přijímačů [3].

Přenosová funkce filtru PP 2.řádu:

$$K(p) = \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + p\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}. \quad (1.5)$$

### 1.2.4 Filtr typu pásmová zádrž

Filtr typu pásmová zádrž (PZ) v angličtině psáno Band-Reject filter (BR) je filtr, který nepropouští signál [1], jehož kmitočet je mezi horním a dolním mezním kmitočtem. Existují aktivní a pasivní zapojení. Pasivní je složeno z rezistorů a kondenzátorů, avšak nevýhodou je, že má ztrátový přenos. Aktivní zapojení má v obvodě ještě operační zesilovač, ten zajišťuje přenos kladných hodnot a už tedy není ztrátový. Využití najdeme v audiotechnice proti nechtěné zpětné vazbě, také je možné ho využít i na jiné blokování nechtěných frekvencí.



Přenosová funkce filtru PZ 2.řádu:

$$K(p) = \frac{p^{\frac{\omega_0}{Q}}}{p^2 + p^{\frac{\omega_0}{Q}} + \omega_0^2}. \quad (1.6)$$

### 1.2.5 Filtr typu fázovací článek

Filtr typu fázovací článek (FZ) v angličtině psáno All-Pass filter (AP) je filtr, který zpracovává signál, a v pásmu frekvencí bude mít stejný zisk, ale zároveň mění fázový vztah mezi různými frekvencemi, to je způsobeno tím že mění jeho fázový posuv. Obecně platí, že filtr je popsán frekvencí, při které fázový posun překračuje 90 °. Obvykle se používají ke kompenzaci jiných nežádoucích fázovacích posunů, které vznikají v systému.

Přenosová funkce filtru FZ 2.řádu:

$$K(p) = \frac{p^2 - p^{\frac{\omega_0}{Q}} + \omega_0^2}{p^2 + p^{\frac{\omega_0}{Q}} + \omega_0^2}. \quad (1.7)$$

## 1.3 Diferenční filtry

Diferenční kmitočtové filtry se používají díky vývoji aktivních prvků s diferenčními vstupy a výstupy čím dál více. Diferenční struktury přinášejí několik výhod oproti nediferenčním strukturám. Zvyšují dynamický rozsah a procento potlačení soufázového signálu, omezují efekty výkonového zesílení [4] a odstraňují harmonické zkreslení signálu.

Nevýhodou diferenčních filtrů je ta, že k jejich realizaci je zapotřebí dvojnásobek aktivních a pasivních prvků, oproti filtrům s nediferenční strukturou. Tím se stává výsledný obvod složitější a to se odrazí na spotřebě energie i na ceně. Obecně se jedná o filtry, které mají dva vstupy (diferenční) a dva výstupy (diferenční) a výsledný nosný signál je dán rozdílem dvou vstupů nebo dvou výstupů.

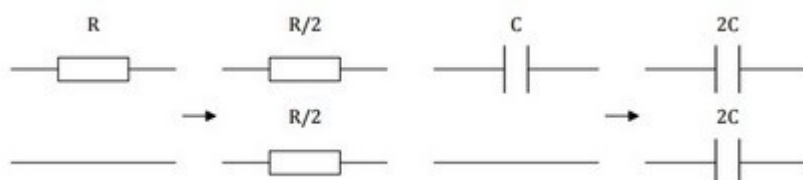
Diferenční filtry jsou součástí telefonních nebo mobilních zařízení. Plní funkci filtru, který filtruje signál na symetrickém vedení. Odděluje datový signál od telefonního.

## 1.4 Návrh diferenčních struktur

Návrh diferenčních struktur můžeme provádět buďto přímo cíleně nebo návrh provedeme nepoužívanějším způsobem a to transformací navržené nediferenční struktury na diferenční. Tato diferenční struktura vznikne zrcadlením nediferenční vůči zemi. Počet pasivních prvků se zvýší zhruba na dvojnásobek. Aktivní prvky, které nemají diferenční vstupy a výstupy, nahradíme prvky diferenčními, které tyto vstupy a výstupy mají. Důležité je, abychom určili hodnoty pasivních zrcadlených prvků. Určíme je podle toho kterou transformaci si pro daný obvod zvolíme. Máme transformaci příčných nebo podélných struktur.

### 1.4.1 Transformace podélných struktur

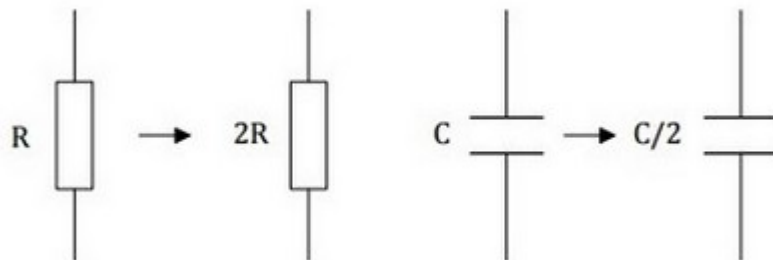
Při transformování pasivních podélných struktur na diferenční zrcadlíme nediferenční strukturu vůči zemi podle [5] Obr.1.3. Při této transformaci měníme pouze prvky, které leží v podélné větvi, ty které leží v příčné měnit nebudeme. Každý kondenzátor, který leží v této podélné větvi, bude mít dvojnásobnou hodnotu proti původní hodnotě a po transformaci vzniknou dva kondenzátory. Hodnota rezistorů se naopak sníží na polovinu a také po transformaci vzniknou dva.



Obr. 1.3: Pravidla transformace podélných rezistorů a kondenzátorů na diferenční strukturu

### 1.4.2 Transformace příčných struktur

Přeměnu pasivních příčných struktur na diferenční realizujeme tak, že zrcadlíme nediferenční strukturu vůči zemi podle [5] Obr.1.4. Při této transformaci měníme pouze prvky, které leží v příčné větvi, ty které leží v podélné měnit nebudeme. Každý kondenzátor, který leží v této příčné větvi, bude mít sníženou hodnotu o polovinu oproti původní hodnotě. A naopak rezistor bude mít hodnotu dvojnásobnou.



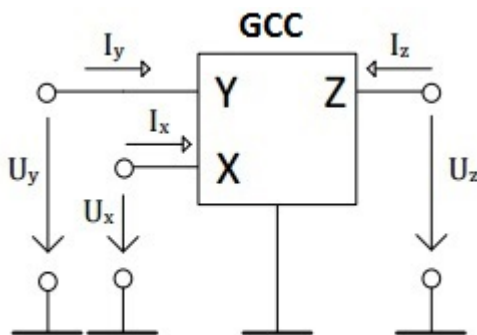
Obr. 1.4: Pravidla transformace příčných rezistorů a kondenzátorů na diferenční strukturu

## 2 AKTIVNÍ PROUDOVÉ PRVKY

V průběhu posledních několika desetiletí byly vyvinuty desítky nových aktivních prvků pro analogové zpracování signálů. V dnešní elektronice se sice nejčastěji využívá jako aktivní prvek operační zesilovač, který pracuje v napěťovém módu [6]. Do budoucnosti se spíše směřuje k proudovému módu, který umožňuje zpracovávat vyšší frekvence. V oblasti s vysokými kmitočty se v dnešní době věnuje velická pozornost filtrům s novými aktivními prvky. To jsou například napěťové a proudové konvejory (UCC, DCVC, DDCC, CCx adt.). Tyto prvky umožňují pracovat na vysokých kmitočtech (stovky MHz).

### 2.1 Obecný proudový konvektor GCC

Obecný proudový konvektor Obr. 2.1 se v moderní elektronice rozlišuje podle počtu bran, tak jako u jiných funkčních bloků. Klasické konvejory jsou trojbranné, kde každá z bran má různou funkci a vlastnosti. Označujeme je písmeny x, y, z. (x - proudová brána, y - napěťová brána, z - výstupní brána).



Obr. 2.1: Schematická značka obecného proudového konvektoru GCC

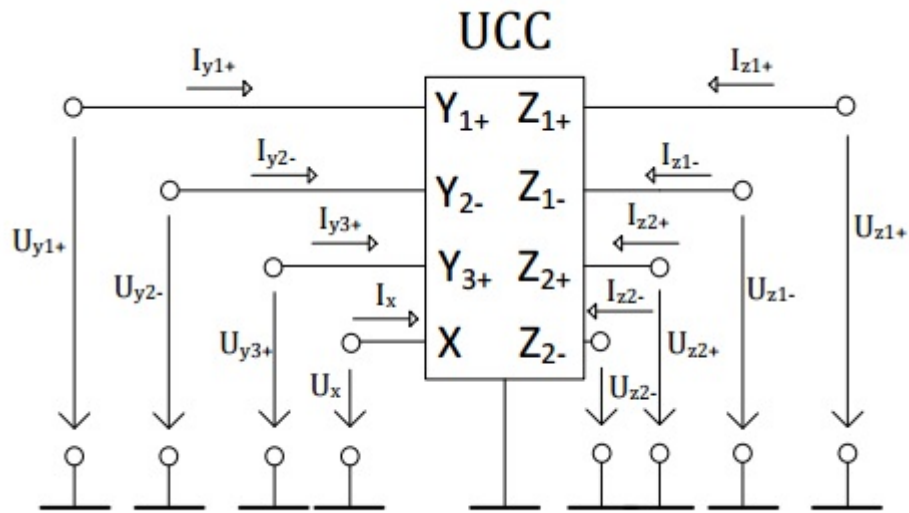
Soustava uzlových proudů ( $I_x, I_y, I_z$ ) teče dovnitř bloku. Soustavu napětí ( $U_x, U_y, U_z$ ), jsou napětí jednotlivých bran, které orientujeme souhlasně do jednoho uzlu.

Pro obecný konvektor platí takhle matice, která vyjadřuje vztahy mezi jednotlivými branami:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$$

## 2.2 Univerzální proudový konvektor UCC

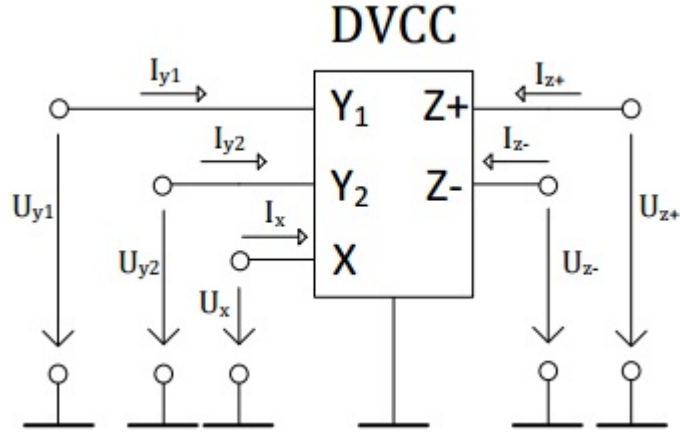
Univerzální proudový konvektor (Univerzal Current Conveyor) definujeme jako obecný osmibran. Má tři vysokoimpedanční napěťové vstupy ( $Y_1, Y_2, Y_3$ ). Vstupy ( $Y_1, Y_2$ ) jsou rozdílové a vstupy ( $Y_1, Y_3$ ) jsou součtové. Dále má jeden nízkoimpedanční vstup  $X$  a čtyři proudové výstupy ( $Z_{1+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$ ). Hlavní předností UCC je jeho univerzálnost. Prakticky všechny doposud existující typy proudových konvektorů mohou být realizovány pomocí UCC. Tohoto lze dosáhnout vhodným propojením jednotlivých jeho svorek [7]. Schématická značka univerzálního proudového konvektoru je na Obr.2.2.



Obr. 2.2: Schématická značka Univerzálního proudového konvektoru UCC

## 2.3 Diferenční proudový konvektor DVCC

DVCC (Differential-Voltage Current Conveyor) je definován jako pětibran. Tento CC má jeden nezávislý vstupní proud  $I_X$ , je tedy konvektorem prvního řádu ( $X=1$ ) [8]. Má dvě rozdílové výstupní brány ( $Z_+, Z_-$ ) a rozdílový napěťový vstup ( $Y_1, Y_2$ ). Má dobré převodní vlastnosti. Impedance na vstupech  $Y$  je vysoká, na vstupu  $X$  je naopak extrémně nízká a impedance na výstupech  $Z$  je zcela vysoká. Schématickou značku vidíme na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Schematická značka Diferenčního proudového konveju DVCC

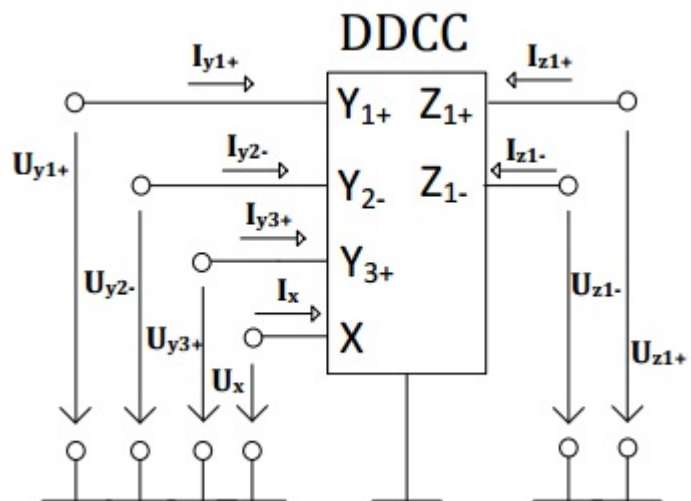
Vztahy mezi jednotlivými svorkami DVCC jsou popsány následující maticí:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_{y1} \\ I_{y2} \\ I_{z1} \\ I_{y2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_x \\ U_{y1} \\ U_{y2} \\ U_{z1} \\ U_{z2} \end{bmatrix}$$

## 2.4 Diferenční rozdílový proudový konveju DDCC

Diferenční rozdílový proudový konveju DDCC (differential difference current conveyor) je definován jako šestibran [9]. DDCC obsahuje tři vstupní svorky napětí s vysokou impedancí ( $Y_1, Y_2, Y_3$ ). Schématická značka DDCC je na Obr.2.4. Vztahy mezi jednotlivými svorkami jsou popsány následující maticí:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_{y1} \\ I_{y2} \\ I_{y3} \\ I_{z1} \\ I_{y2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_x \\ U_{y1} \\ U_{y2} \\ U_{y3} \\ U_{z1} \\ U_{z2} \end{bmatrix}$$



Obr. 2.4: Schematická značka Diferenčního rozdílového proudového konvejeoru DVCC

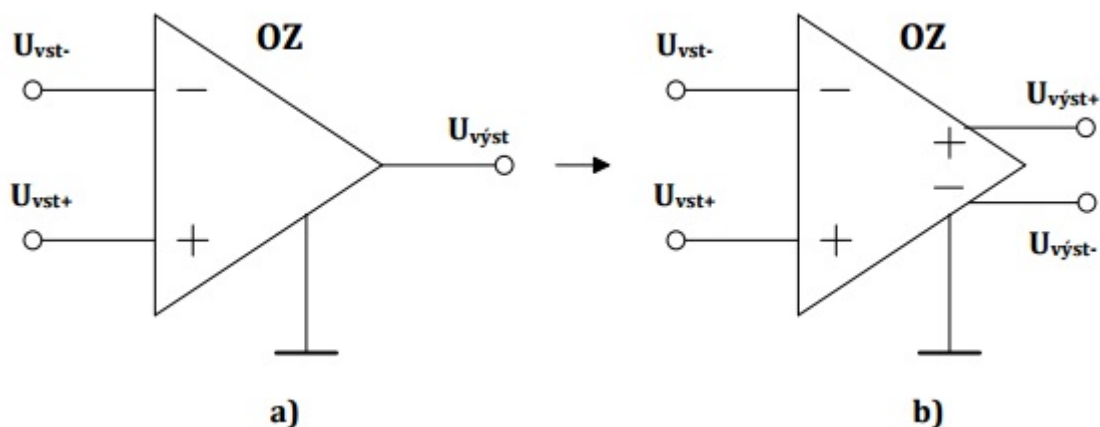
### 3 FILTRAČNÍ STRUKTURY

Pro vytvoření filtračních struktur prvek DDCC (differential difference current conveyor), který vznikl obměnou diferenčního proudového konveju DVCC. Konveju DVCC a DDCC jsem popisoval v kapitole 2.3 a 2.4.

#### 3.1 Transformace nesymetrických struktur na symetrické s aktivními prvky

Transformace u pasivních prvků byla popsána v kapitole 1.4. Pokud budeme uvažovat o transformaci aktivních prvků transformace je následující.

Aktivní diferenční prvky obecně mají dva vstupy a dva výstupy. Ty mají opačnou polaritu a mohou tvořit dvě zpětné vazby. Když odečteme dva vstupní nebo dva výstupní signály dostaneme signál výsledný. Na Obr. 3.2 a) vidíme operační zesilovač s nediferenčním výstupem. Pokud ho budeme chtít transformovat na diferenční, tak mu musíme přidat ještě jeden výstup. Výsledný výstup musí být invertovaný, jak je tomu na Obr. 3.2 b).

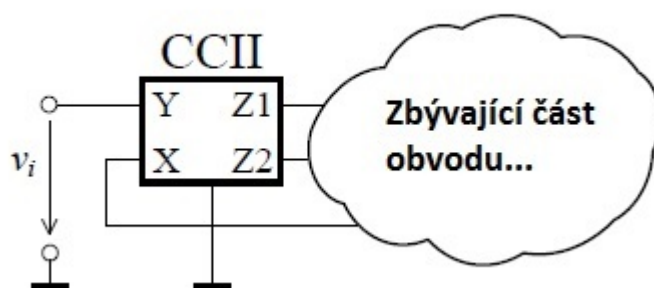


Obr. 3.1: a) Klasické zapojení OZ, b) Diferenční zapojení OZ

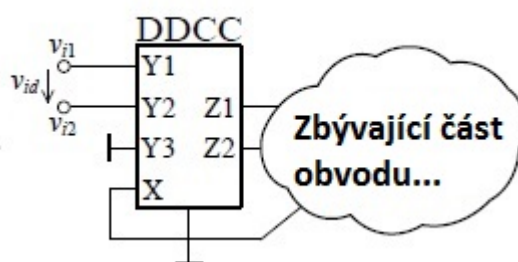


## 3.2 Transformace nesymetrických vstupů na symetrické v napěťovém režimu

Transformaci z nesymetrické struktury na symetrickou budu popisovat pomocí, již výše popsaných, konvejořů. Jako příklad nesymetrické struktury uvádím zapojení s konvejořem druhé generace Obr. 3.2, který je vyčleněn z celkového zapojení. Pro výchozí nesymetrické struktury jsou vhodné takové, kde na napěťovou bránu Y aktivního prvku je přímo přiveden vstupní signál. K cílenému symetrickému vstupu, lze využít aktivního prvku DDCC Obr. 3.3.



Obr. 3.2: Nesymetrická struktura vstupu s konvejořem CCII



Obr. 3.3: Symetrická struktura vstupu s konvejořem DDCC

Vstupní diferenční signál je přiváděn přímo na napěťové vstupní brány konvejořu DDCC. Kde tento vstup je popsán rovnicí (3.1). Kde  $v_{i1}$  je vstup do napěťové brány  $Y_1$ ,  $v_{i2}$  je vstup do napěťové brány  $Y_2$ , Jejich rozdílem získáme vstupní diferenční signál  $v_{id}$ .  $v_{ic}$  je průměr dvou vstupních diferenciálních signálů rovnice 3.2.

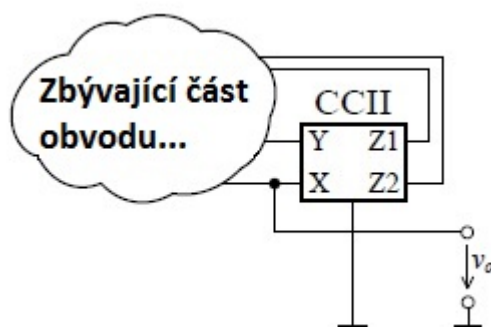
$$v_{id} = v_{i1} - v_{i2} \quad (3.1)$$

$$V_{ic} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}. \quad (3.2)$$

K transformaci nesymetrického vstupu na symetrický je tak nahrazen pouze jeden aktivní prvek. Zbytek obvodu je nezměněn. Z principu transformace tedy vyplývá, že je nutné vytvořit rozdíl odpovídajících si vstupních napětí, přičemž jedno z nich musí být posunuto o  $180^\circ$ .

### 3.3 Transformace nesymetrických výstupů na symetrické v napěťovém režimu

Na Obr. 3.4 máme zobrazeno nesymetrickou strukturu výstupu v napěťovém módu. Zde se jedná o konvektor druhé generace s jedním výstupem  $v_o$ . Pokud se jedná o struktury pracující v napěťovém módu, mezi nejjednodušší způsob realizace je ten, že doplníme struktury o napěťový invertor Obr. 3.5. Tento způsob lze použít u libovolné napěťové odezvy.



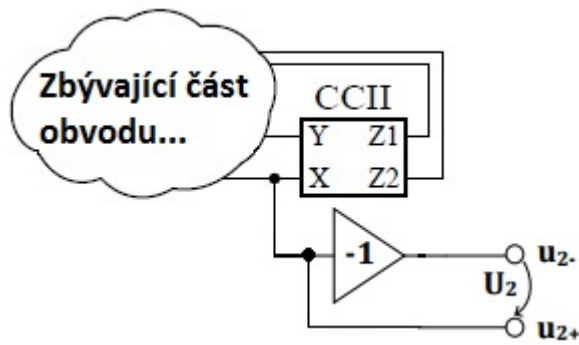
Obr. 3.4: Nesymetrická struktura výstupu s konvejorem CCII

Jestliže napěťová odezva je snímána v uzlu, kde je připojena brána X aktivního prvku, můžeme přistoupit k efektivnějšímu způsobu. Tento způsob je takový, že nahradíme původní aktivní prvek CCII diferenčním rozdílovým proudovým konvejorem DDCC Obr.3.6. U toho řešení se využívá toho, že invertor je už implementován uvnitř aktivního prvku.

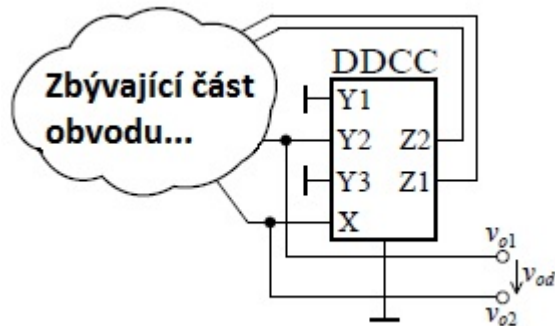
Diferenční výstupní napětí  $v_{od}$  je definováno jako rozdíl výstupních signálů  $v_{o1}$  a  $v_{o2}$ , tak jak je napsané v rovnici 3.3.

$$V_{od} = V_{o1} - V_{o2} \quad (3.3)$$

Diferenční výstupní napětí je také definováno jako je uvedeno v rovnici 3.4. Kde  $A_{dm}$  je zisk při diferenčním módu a  $A_{cm}$  je zisk při normálním (nediferenčním) módu.



Obr. 3.5: Symetrická struktura výstupu s konvejorem CCII a invertorem



Obr. 3.6: Symetrická struktura výstupu s konvejorem DDCC

$$v_{od} = A_{dm}v_{id} + A_{cm}v_{ic} \quad (3.4)$$

CMRR (Common-mode rejection ratio) potlačení souhlasného signálu je mírou odmítnutí zařízením nežádoucích vstupních signálů. Ideální diferenční zesilovač bude mít nekonečnou CMRR. Je to důležitý parametr, protože ukazuje jak velká část signálu, za normálního režimu, se objeví v našem měření. Je dán vztahem 3.5.

$$CMRR = 20\log \frac{|A_{dm}|}{|A_{cm}|} \quad (3.5)$$

### 3.4 Transformace nesymetrických vstupů na symetrické v proudovém režimu

Transformaci nesymetrických vstupů na symetrické budu popisovat, jak pomocí vyvedených uzlů ze zapojení obvodu, tak pomocí konvektorů popsaných v předešlých kapitolách.

Na Obr. 3.7 je znázorněn nesymetrický vstup. Jde o to, že ze zapojení je vyčleněn uzel do kterého je přiveden vstupní proud, kdy zbytek obvodu se nemění a zůstává stejný.



Obr. 3.7: Nesymetrický vstup v proudovém režimu

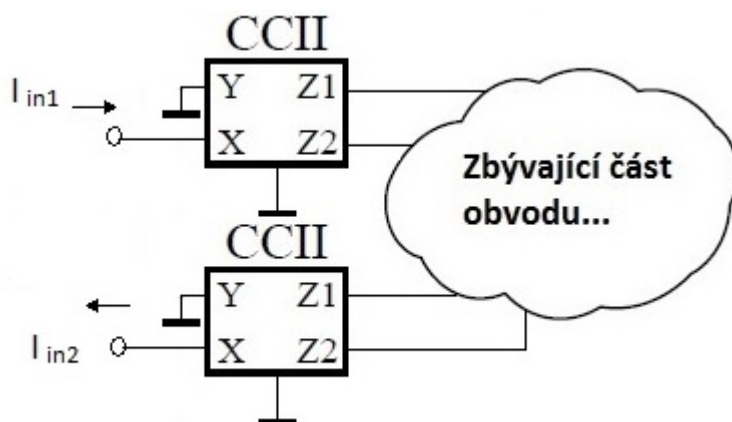
Abych takový vstup převedl a symetrický, musím obecně najít nebo vytvořit vhodný uzel v obvodu na který přivedu vstupní proud, který bude o 180 stupňů posunutý oproti vstupnímu proudu prvnímu. Takové zapojení je znázorněno na Obr. 3.8.



Obr. 3.8: Symetrický vstup v proudovém režimu

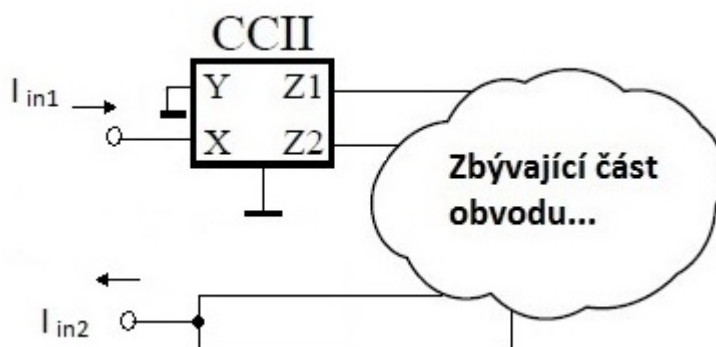
Další možností jak vytvořit symetrické zapojení je takové, že obvod který je zapojený pomocí konvektorů, jak je to i v mém případě, najdu dva konvejory a na jeho proudové vstupní svorky X přivedu vstupní proud. Ale pokud se jedná o proudový

režim tak napěťové svorky musí být uzemněny jak jsem zmiňoval v kapitole již dříve. Na obrázku 3.9 je znázorněn takový obvod.



Obr. 3.9: Symetrický vstup v proudovém režimu s konvejory

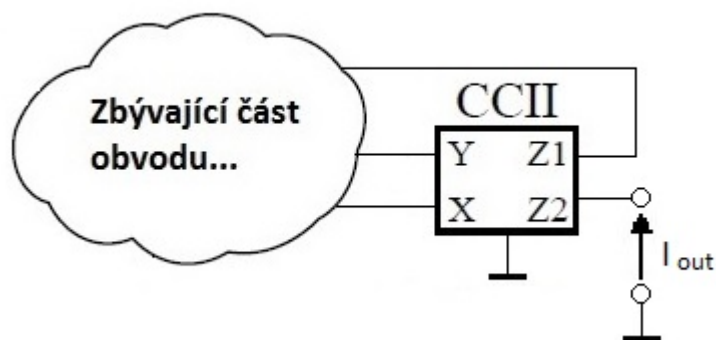
Popřípadě je také možnost kombinovat výše popsané možnosti, tak jak je znázorněno na Obr. 3.10.



Obr. 3.10: Symetrický vstup v proudovém režimu kombinovaná možnost

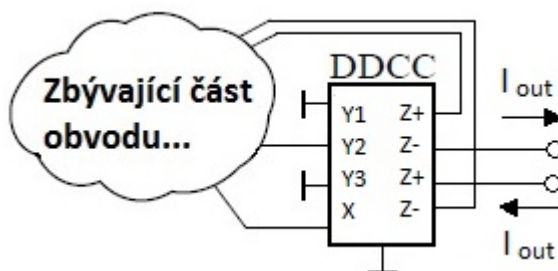
### 3.5 Transformace nesymetrických výstupů na symetrické v proudovém režimu

Na Obr. 3.11 je znázorněn konvektor CCII, který je vyčleněn z celkového zapojení. Nesymetrický výstup je vyveden ze svorky Z2 proti zemi. Zbytek zapojeného obvodu se nemění.



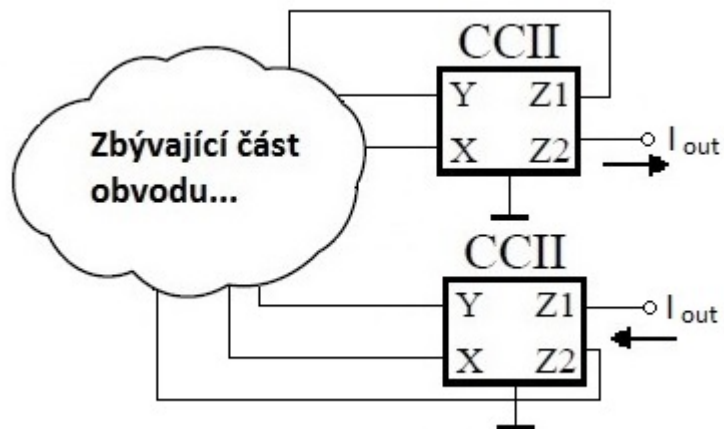
Obr. 3.11: Nesymetrický výstup v proudovém režimu

Symetrický výstup obvodu získáme tím, že v obvodu si najdeme konvektor, který má dvě dvojce výstupních svorek. Jedná se o konvektor DDCC. Výstupní proud vyvedeme ze svorky Z- jedné dvojce a z druhé dvojce svorek musíme výstup vyvést ze Z+. Výstupní proudy jsou proti sobě posunuty o 180 stupňů. Tím jsme získali symetrický výstup jak je znázorněno na Obr. 3.12.



Obr. 3.12: Symetrický výstup v proudovém režimu

Další možností jak získat symetrický výstup je na Obr. 3.13. Zde jde vidět že jsou výstupy vyvedené ze svorek konvektoru CCII. Pokud z prvního konvektoru vyvedeme výstup ze svorky Z2 tak z druhého musíme vyvést ze svorky Z1. A to proto, aby nám vznikly dva proudy, které budou proti sobě posunuty o 180 stupňů. Pokud by jsme z prvního konvektoru vyvedly výstup ze svorky Z1 tak ze druhému konvektoru musíme výstup vyvést ze svorky Z2.



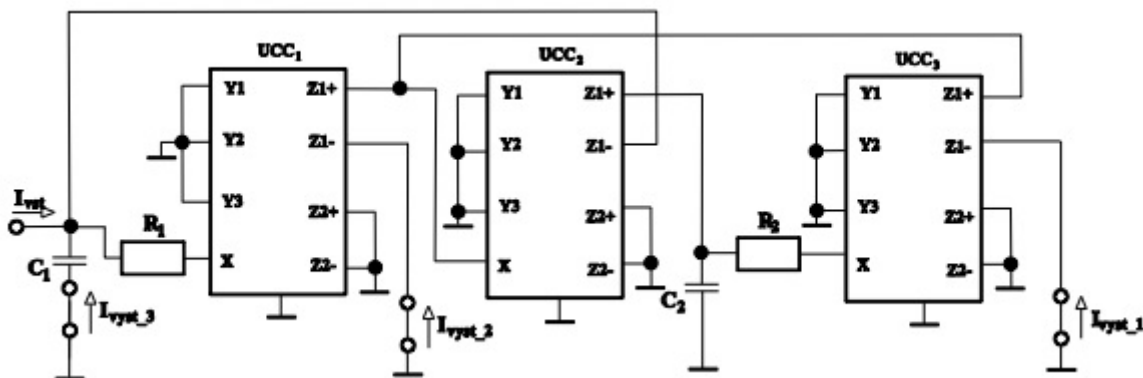
Obr. 3.13: Symetrický výstup v proudovém režimu se dvěma konvejory

## 4 TRANSFORMACE NESYMETRICKÝCH FILTRŮ NA SYMETRICKÉ

Principy a jednotlivé kroky transformace nesymetrických struktur filtrů na symetrické struktury si popíšeme na konkrétním příkladě. Budeme aplikovat způsob, který jsem už pospal v předešlých kapitolách.

### 4.1 Nesymetrické zapojení

Pro moji práci, na které vysvětlím princip transformace z nesymetrické struktury filtru na symetrickou a návrh pseudodiferenčního kmitočtového filtru, jsem si vybral zapojení multifunkčního kmitočtového filtru 2. řádu s univerzálním proudovým konvejorem vycházejícího z [10]. Obvod je sestaven ze tří aktivních prvků. Jedná se o aktivní prvky UCC (Universal Current Conveyor) univerzální proudový konvektor. Jelikož se jedná o obvod pracující v proudovém módu, tak jeho vstupní napěťové svorky  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  jsou přivedené na zem. A protože využívá pouze dvě výstupní brány  $Z$ , také brány  $Z_{2+}$  a  $Z_{2-}$  každého UCC jsou uzemněny. Obvod je dále obsahuje dva rezistory, které jsou předřazené před vstupní proudovou branou  $X$  konvektorů  $UCC_1$  a  $UCC_3$ .



Obr. 4.1: Multifunkční kmitočtový filtr 2. řádu s UCC

Charakteristická rovnice obvodu (Obr. 4.1) je:

$$D(p) = p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p 2 C_2 R_2 + 1 = 0 \quad (4.1)$$



Obvod v proudovém režimu je možné provozovat jako filtry dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmovou zadrž (PZ), pásmovou propust (PP). Jejich přenosové funkce jsou popsány následujícími rovnicemi:

$$K_1(p) = \frac{I_{vyst1}}{I_{vst}} = -\frac{1}{D(p)} \quad (4.2)$$

$$K_2(p) = \frac{I_{vyst3}}{I_{vst}} = -\frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{D(p)} \quad (4.3)$$

$$K_3(p) = \frac{I_{vyst2}}{I_{vst}} = -\frac{p C_2 R_2}{D(p)} \quad (4.4)$$

$$K_4(p) = \frac{I_{vyst1} + I_{vyst3}}{I_{vst}} = -\frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + 1}{D(p)} \quad (4.5)$$

Kde přenosová funkce  $K_1(p)$  je přenosovou funkcí dolní propusti,  $K_2(p)$  horní propusti,  $K_3(p)$  pásmové propusti a  $K_4(p)$  pásmové zadrž. Z těchto rovnic je zřejmé, že obvod na výstupu  $I_{vyst1}$  se chová jako dolní propust, na  $I_{vyst2}$  jako pásmová propust,  $I_{vyst3}$  jako horní propust a pokud sečteme výstupy 1 a 2, lze obvod využít jako pásmovou zadrž.

Ve všech případech je rezonanční úhlová frekvence  $\omega_0$  a činitel jakosti  $Q$  stejný.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.6)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R_1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.7)$$

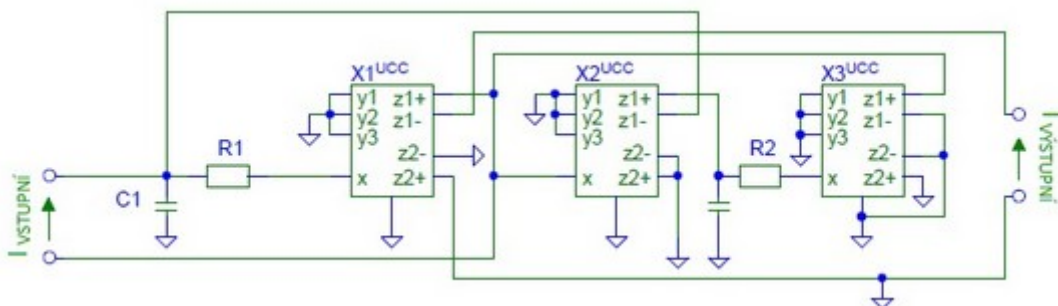
## 4.2 Realizace symetrického zapojení

Transformaci nesymetrických zapojení na symetrické jsme si popsali v kapitole 3. Nyní si ukážu, jak probíhá taková realizace. Multifunkční kmitočtový filtr 2. řádu s UCC budeme realizovat jako symetrické diferenční zapojení obvodu.

Pro návrh obvodu jsem použil zapojení, které jsem popsal o kapitolu výše. Budu zde aplikovat podmínky, které jsem popsal aby se obvod choval jako symetrický.

### 4.2.1 Modifikace zapojení - filtr typu dolní propust 1

Zapojení dle obr. 4.2 se, po simulaci na výstupu, chová jako filtr dolní propusti. Aby tomu tak bylo, musel jsem provést určitou změnu. Vnitřní zapojení obvodu jsem nezměnil. Vstupní proud jsem přivedl do vstupní proudové svorky X druhého UCC a uzlu před  $R_1$ . Tak aby byla splněná podmínka symetrických vstupů popsaná v kapitole 3.4. Výstupní odezvu jsem vzal z výstupních svorek prvního konvejeoru UCC. Ze svorek Z1- a Z2+. Z2- je uzemněná, tak jako všechny vstupní napěťové svorky Y. Dále zapojení obsahuje dva rezistory  $R_1$  a  $R_2$ , které jsou předřazeny vstupní branám X obou konvejeorů prvního a třetího UCC a dva kondenzátory  $C_1$ ,  $C_2$ , které jsou přivedeny na zem.



Obr. 4.2: Realizace diferenčního zapojení s filtrem typu dolní propust

$$\frac{I_{\text{vyst}}}{I_{\text{vst}}} = \frac{1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p(2C_2 R_2) + 1} \quad (4.8)$$

Z přenosové rovnice vyplývá, že se jedná o filtr typu dolní propust. Pro návrh pasivních součástek jsem zvolil  $f_0$  100kHz a činitel jakosti  $Q=0,75$ . Z funkce získáme rezonanční kmitočet  $\omega_0$  a činitel jakosti  $Q$ , které jsou dány vztahy:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.9)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R_1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.10)$$

Vidíme že se rovnice od původního nesymetrického zapojení neliší a jsou stejné. Pro návrh pasivních prvků jsem zvolil kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  hodnoty 1nF. Rovnice pro výpočet a návrh rezistorů jsou vyjádřeny z rovnic 4.9 4.10.

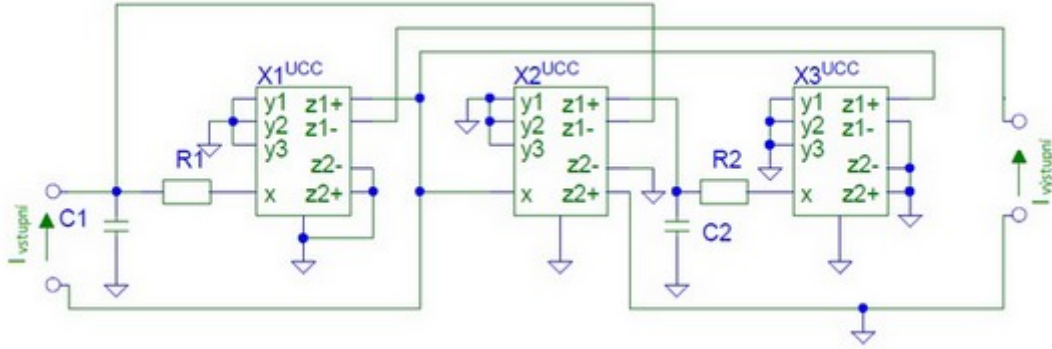
$$R_1 = \frac{1}{C_1 C_2 R_2 (2\pi f_0)^2} \quad (4.11)$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{1}{4(C_2)^2(2\pi f_0)^2 Q^2}} \quad (4.12)$$

Po dosazení všech známých hodnot do rovnic 4.11 a 4.12 jsem získal hodnoty rezistorů R. Rezistor  $R_1$  volím 2k4 a rezistor  $R_2$  volím 1k1.

### 4.2.2 Modifikace zapojení - filtr typu dolní propust 2

Na obrázku 4.3 je znázorněno další možnost zapojení, které se chová jako diferenční kmitočtový filtr. Podle přenosové funkce se na výstupu také chová jako filtr typu dolní propust.



Obr. 4.3: Realizace diferenčního zapojení s filtrem typu dolní propust

Přenosová funkce filtru:

$$\frac{I_{vyst}}{I_{vst}} = \frac{1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p(2C_2 R_2) + 1} \quad (4.13)$$

Z této přenosové rovnice lze odvodit rovnice rezonančního kmitočtu  $\omega_0$  a činitele jakosti Q:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.14)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 R_1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.15)$$

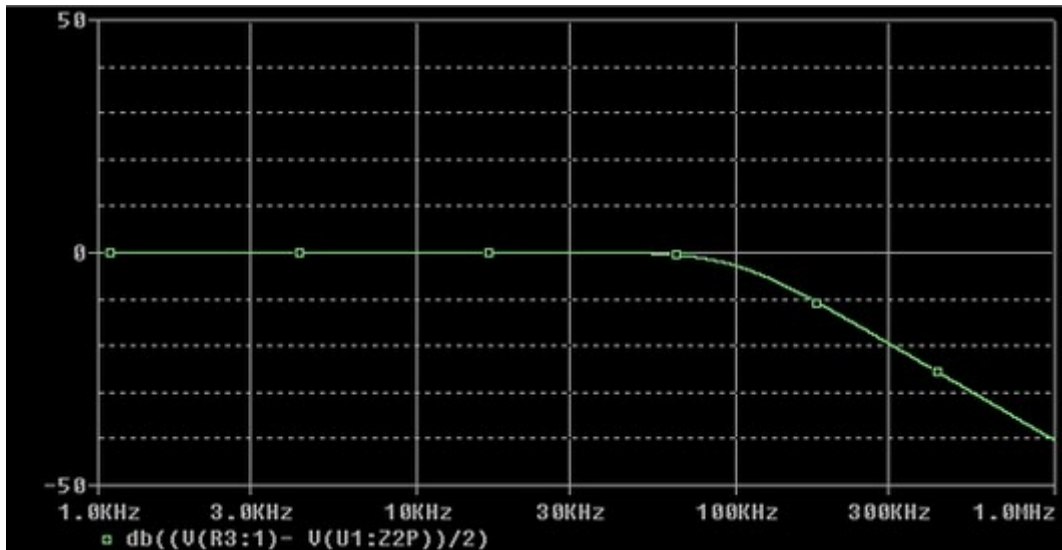
Z těchto rovnic lze odvodit také rovnice pro návrh pasivních součástek.

$$R_1 = \frac{1}{C_1 C_2 R_2 (2\pi f_0)^2} \quad (4.16)$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{1}{4(C_2)^2(2\pi f_0)^2 Q^2}} \quad (4.17)$$

U toho to obvodu jsem se rozhodl navrhnout filtr tak, aby mezní frekvence  $f_0$  byla 100kHz. To znamená, že kmitočty nižší než je 100kHz propouští. Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  volím 1nF a a činitel jakosti  $Q = 0,75$ . Po dosazení hodnot do rovnic 4.16 a 4.17 jsem získal hodnoty rezistorů, kdy  $R_1$  volím 2k4 a rezistor  $R_2$  volím 1k1.

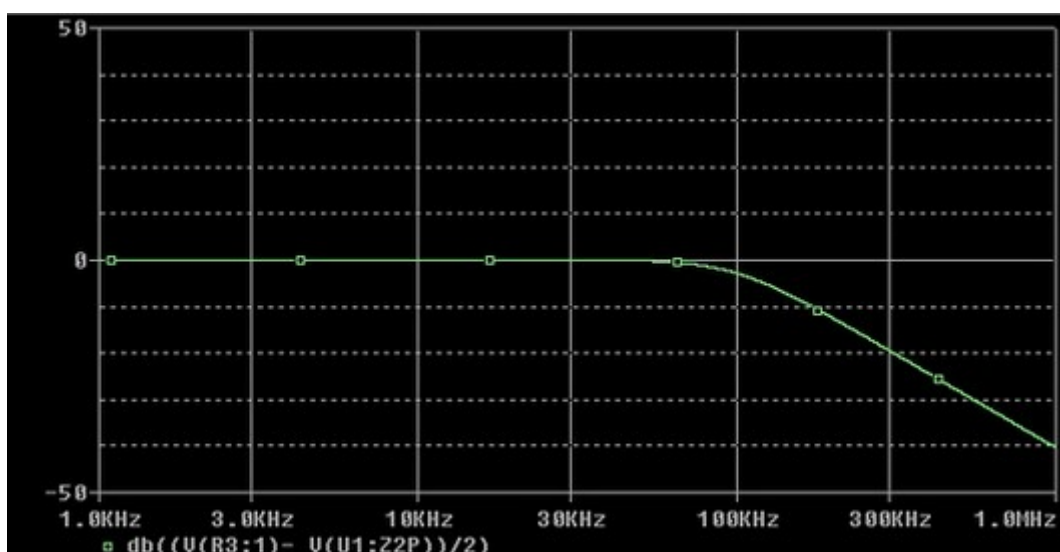
Přenosová funkce filtru:



Obr. 4.4: Přenosová charakteristika filtru DP

## 5 SIMULACE

Pro svou praktickou část jsem si zvolil řešení obvodu modifikací zapojení filtru typu dolní propust 1. Simulaci jsem provedl pomocí programů Snap a Orcad. Obvod jsem navrhl, tak jako je popsán v předešlé kapitole. Simulace toho to obvodu proběhla úspěšně a navržený filtr se dle této simulace pravdu chová jako filtr typu dolní propust druhého řádu. Přenosová charakteristika simulovaného obvodu je na Obr. 5.1 .



Obr. 5.1: Přenosová charakteristika filtru DP

z této charakteristiky jsem zjistil, že při poklesu modulové charakteristiky o 3dB je  $f_0$  skutečně 100 kHz. Což znamená, že takový to filtr by signály z nižšími kmitočty než je  $f_0$  propouští a signály vyšší než 100kHz potlačuje.

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Pro praktickou část měření, byl zvolen kmitočtový filtr dolní propusti 1 z kapitoly 4.2.1 pro upřesnění je to Obr. 4.2. Tento obvod je složen ze tří aktivních prvků. Jedná se o aktivní UCC, univerzální proudové konvejory. Dále zapojení obsahuje pasivní prvky. Jedná se o rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  a dva kondenzátory  $C_1$ ,  $C_2$ . Pro měření byli použity dva univerzální proudové konvejory UCCX-0349-SMD [11], kde první byl modifikován jako UCC a byl použit pro zapojení převodníku  $U/I$ , bez kterého bychom nemohli zapojení proměřit. Jeho vnitřní blok CCII+- byl použit pro samotné zapojení filtru jako druhého bloku. Další UCCX byl modifikován jako UCC pro zapojení filtru a to prvního bloku. Jeho vnitřní blok CCII+- byl modifikován jako třetí blok zapojení. Realizované symetrické zapojení na Obr. 4.2 bylo odsimulováno v prostředí OrCAD 10.3. Veškeré naměřené hodnoty a grafy jsme získaly za pomoci obvodového analyzátoru 4395 A.

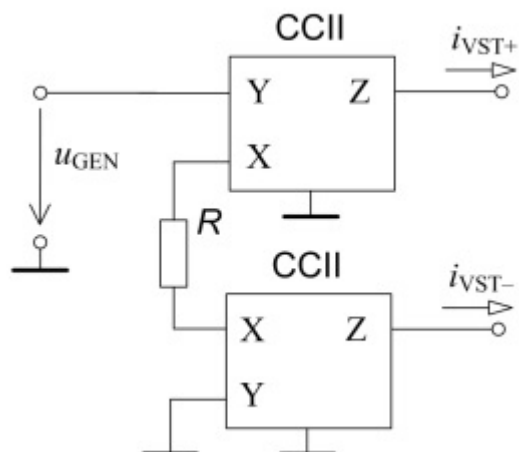
Jelikož se jedná o diferenční filtr v proudovém režimu a abychom mohli takovýto filtr proměřit musíme docílit toho když přivedeme nediferenční napětí abychom ho převedli na diferenční proud.

### 6.1 Převodník napětí na proud $U/I$

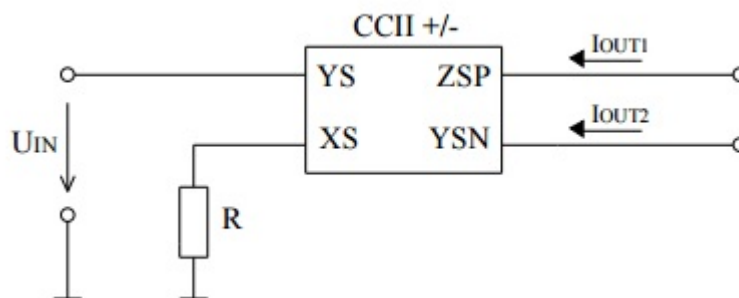
Je několik možností jak nediferenční napětí převést na diferenční proud. Jedna z možností je že převedeme nejprve napětí na diferenční napětí pomocí převodníku  $U/U_{dif}$  a nebo hned přímo převedeme napětí  $U/I_{dif}$ . Takovýto převodník lze realizovat několika způsoby.

Na Obr. 6.1 je zobrazen převodník nediferenčního napětí na diferenční proud. Je realizován pomocí dvou konvektorů CCII, a jednoho pasivního rezistoru  $R$ . Který je propojen mezi vstupními proudovými svorkami  $X$  obou konvektorů. Tato možnost se mi nezamlouvala jelikož bych musel přidat další aktivní prvek do zapojení. Proto jsem hledal další řešení. Další možností jak realizovat převodník je zobrazen na obrázku 6.2. Je jednoduchý na konstrukci kdy se skládá pouze z jednoho aktivního prvku a to konvektoru CCII+/- a rezistoru  $R$ . Výstupní proudy jsou fázově posunuty o 180 stupňů.

Pro mou realizaci jsem zvolil zapojení s jedním konvektorem CCII. Tento konvektor je realizován jak jsem již výše popsal.



Obr. 6.1: Převodník U/Idif



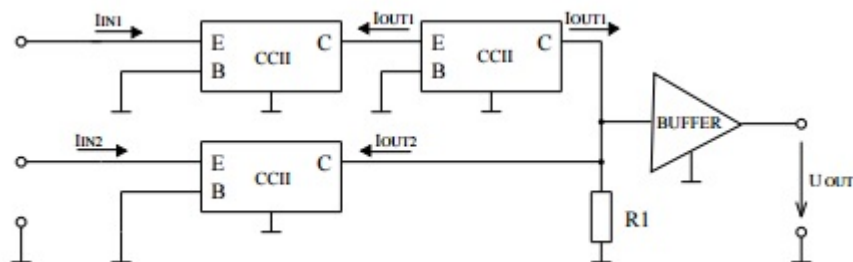
Obr. 6.2: Převodník U/Idif

## 6.2 Převodník napětí na proud I/U

Převodníky diferenčního proudu na napětí pracují na stejném principu jako převodníky opačné, tudíž převádí symetrické proudy na nesymetrická napětí. Opět máme několik možností jak toto zapojení provést.

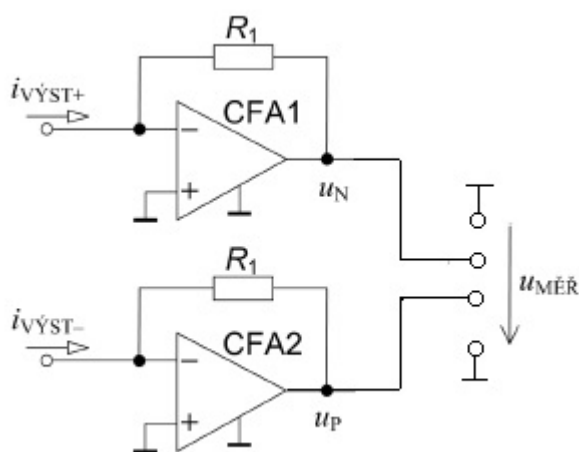
Převodník diferenčních proudů na napětí je sestaven ze tří CCII. Dva z nich jsou zapojeny v sérii na jedné větvi diferenčního signálu a třetí je na druhé větvi diferenčního signálu. Rezistor  $R_1$  má tu funkci, že se na něm signály odečtou a převedou na nediferenční napětí. V zapojení je také zařazen buffer. Je tam pro

správné nastavení přenosu signálu a především kvůli impedančnímu přizpůsobení výstupu převodníku.



Obr. 6.3: Převodník  $I_{dif}/U$

Na obrázku 6.4 vidíme další možné zapojení, které jsem také použil do své práce. Je realizováno obvodem AD 8429. Kde na výstupních svorkách proti zemi je možné naměřit napětovou odezvu.

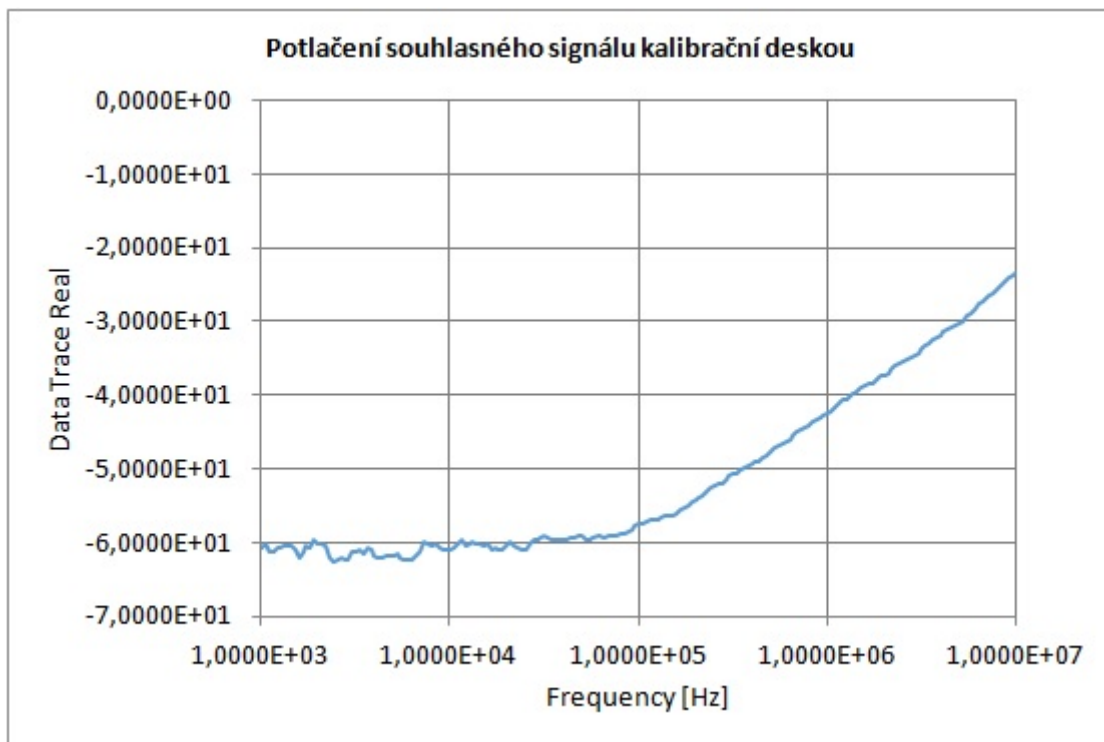


Obr. 6.4: Převodník  $I_{dif}/U$

## 6.3 Měření

Před samotným měřením jsem musel nejprve použít kalibrační desku, abych mohl samotný filtr odměřit na obvodovém analyzátoru 4395A. Tato kalibrační deska slouží ke kalibrování obvodového analyzátoru. Po připojení kalibrační desky k analyzátoru a připojení napájení jsme dostali průběh potlačeného souhlasného signálu touto kalibrační deskou Obr. 6.5.



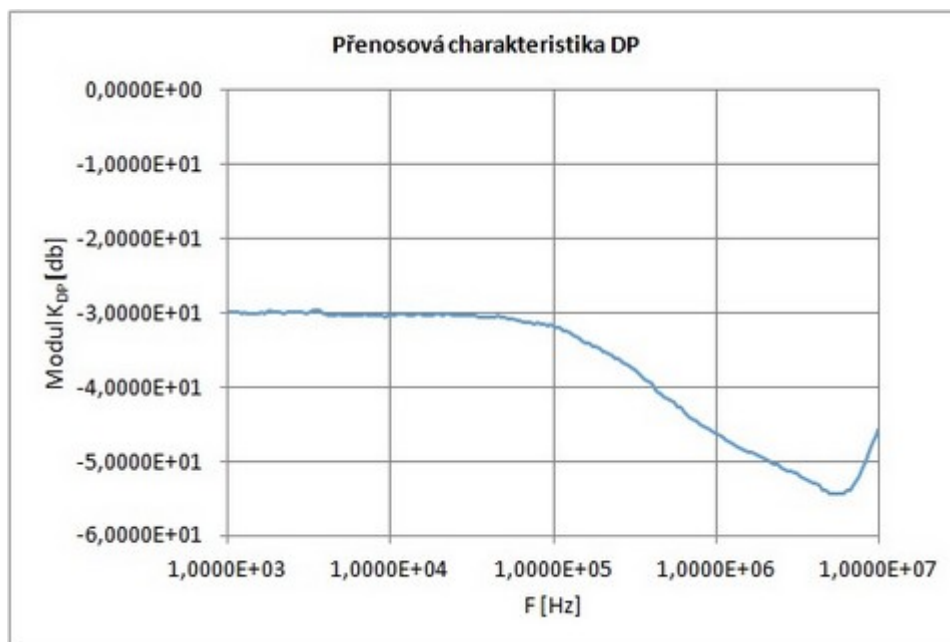


Obr. 6.5: Průběh potlačení souhlasného signálu

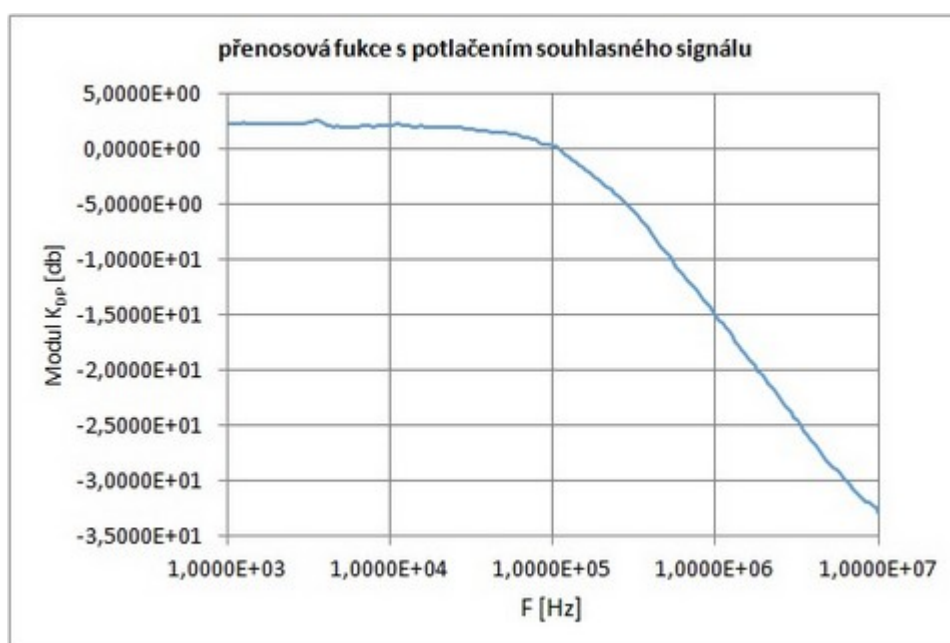
Návrh desek plošných spojů kmitočtového filtru dolní propusti a kalibrační desky byl vytvořen s programem Eagle 6.5.0 od Cadsoft. Dokumentace k těmto deskám je v příloze A a B.

Přenosová charakteristika diferenčního kmitočtového filtru dolní propusti změřená v experimentálním měření je uvedena na Obr. 6.6. Výsledkem experimentálního měření bylo to, že měřený obvod se bohužel nechová jako doplní propust vyššího řádu ale jako jednoduchá dolní propust, i když v simulaci programem Orcad, jak je znázorněno v kapitole 5 Obr. 5.1, kde se obvod chová jako kmitočtoví filtr vyššího řádu, tak při experimentálním měření tomu tak není.

Schopnost potlačení souhlasného signálu diferenčním filtrem je ukázána na Obr.6.7. Zapojení bylo buzeno souhlasným signálem o amplitudě -13 dBm. Průběh měření je sice relativně lepší a jde vidět že obvod zesiluje signál ale výsledek měření je ten že to neodpovídá, tak jak jsem očekával a neodpovídá to ani simulaci.



Obr. 6.6: Průběh přenosové charakteristiky DP



Obr. 6.7: Průběh potlačení souhlasného signálu

## 7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá návrhem pseudodiferenčních kmitočtových filtrů a zaměřil jsem ji na návrh pomocí proudových konvektorů.

V úvodu práce se zabývám obecným popisem a vlastnostmi kmitočtových filtrů a diferenčních filtrů. Dále jsem popisoval návrh diferenčních struktur pasivních prvků. Návrh transformace podélných struktur a transformace struktur příčných. V další kapitole popisuji aktivní proudové prvky a jejich schématické značky, vstupní výstupní brány. Především se zabývám aktivními proudovými konvejory GCC, UCC, DVCC, DDCC. Ty budu dále využívat při návrhu filtrů.

Ve 3. kapitole se věnuji transformaci nesymetrických struktur na struktury symetrické s proudovými konvejory popsány v kapitole 2. Tuto transformaci dále využívám jako hlavní způsob jak navrhnout diferenční kmitočtový filtr.

V poslední kapitole jsem si vzal nesymetrické, nediferenční zapojení. Jedná se o Multifunkční kmitočtový filtr 2. řádu s UCC, na který jsem, podle transformací popsanych v kapitolách 3.4 a 3.5, aplikoval způsob návrhu a změnu nediferenčních struktur na diferenční. Zapojení pracuje v proudovém módu. Získal jsem modifikace zapojení, které se chovají jako pseudodiferenční kmitočtový filtr, pracující jako dolní propust DP. Oproti původnímu zapojení, ale řeší pouze jedno filtrační typ filtru. Byli odsimulovány obě možné varianty a výsledné simulace jsou uvedeny výše.

Experimentální měření probíhalo tak, že jsem musel z původního návrhu oddělat AD8429 a doplnit zapojení o dva rezistory 1k, abych mohl změřit napěťovou odezvu. Ale po odměří jsem zjistil, že modifikace zapojení filtru se chová jako jednoduchý filtr dolní propusti a nechová se tak jako při simulaci v programu Orcad 10.3. Takže výsledek je ten, že takovýto obvod nepracuje jak by mě a bohužel i když simulace odpovídala tomu, že by zapojení mělo fungovat tak, jak jsem očekával, tak v praktické části jsem si ověřil, že tomu tak není.

## LITERATURA

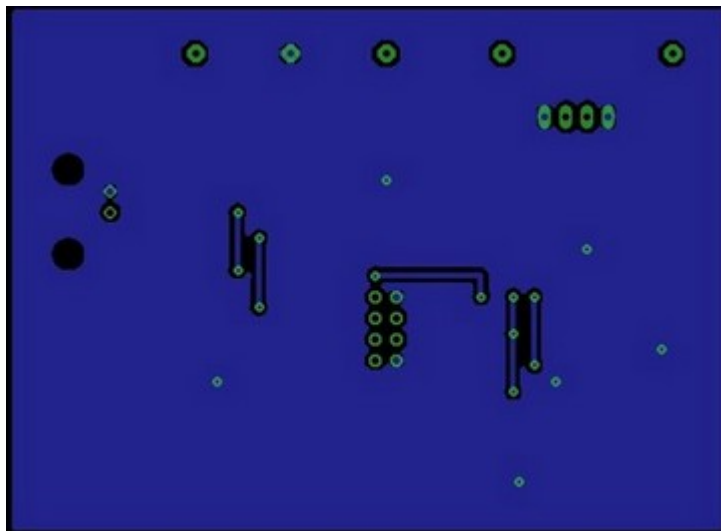
- [1] HÁJEK, Karel a SEDLÁČEK Jiří. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [2] Information Engineering.[online]. 26.11.2015. Dostupné z URL: <http://www.robots.ox.ac.uk/~sjrob/Teaching/SP/l2.pdf>
- [3] *Bandpass filter*. Whatls.com. [online]. 26.11.2015. Dostupné z URL: <http://whatis.techtarget.com/definition/bandpass-filter>
- [4] SUN, Y. *Design of High Frequency Integrated Analogue Filters*, IET 2002.
- [5] ŠTORK, P. *Návrh plně diferenčních kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky za pomoci metody grafů signálových toků*. BRNO, 2014. 91s. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Lukáš Langhammer
- [6] SUCHÁNEK, T. *Elektronicky řiditelné kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky*. BRNO, 2011. 59s. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. David Kubánek Ph.D.
- [7] BEČVARŠ P.; VRBA K.; *Univerzální proudový konvektor*[online]. Elektronický časopis. Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00007/index.html>
- [8] ČAJKA, J.; DOSTÁL, T.; VRBA, K. *Nové názvosloví a sjednocující pohled na proudové konvektory* [online]. Elektronický časopis. Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01024/index.html>.
- [9] SUDHANSBU MAHESHWARI, ANKITA GANGWAR, *Versatile Voltage-Mode Universal Filter Using Differential Difference Current Conveyor*, [pdf], Circuits and Systems, 2011, Dostupné z URL: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?paperID=6139>.
- [10] JAŠEK, F. *Návrh nových aktivních filtrů pomocí grafů signálových toků*. Ústav telekomunikací. BRNO, 2010, 71s. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce prof. Ing. KAMIL VRBA, CSc
- [11] UCC-N1B520, Universal current conveyor (UCC) and sekond-generation current conveyor (CCII+/-)

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

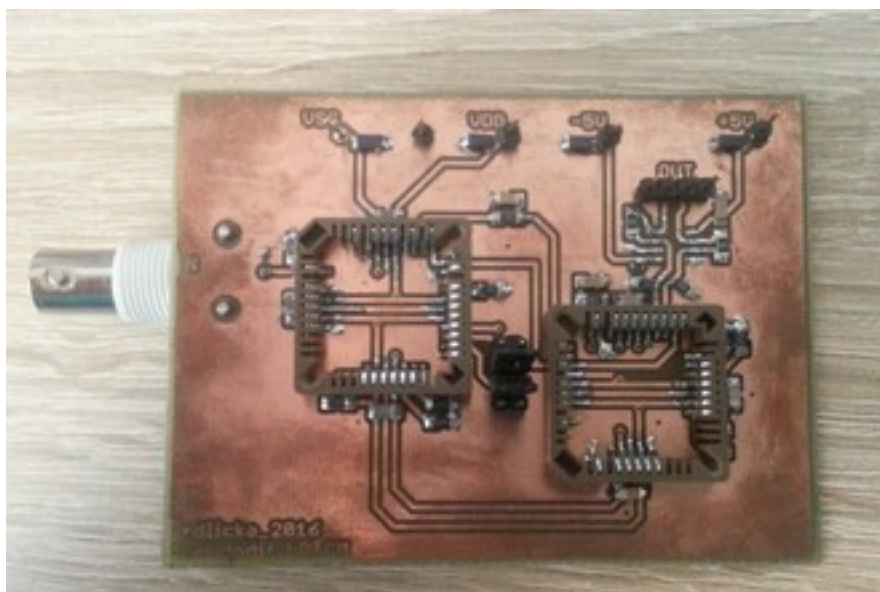
$U_1$	vstupní napětí [V]
$U_2$	výstupní napětí [V]
$U_x$	napětí na uzlu X [V]
$U_y$	napětí na uzlu Y [V]
$U_z$	napětí na uzlu Z [V]
$I_1$	vstupní proud [A]
$I_2$	výtupní proud [A]
$I_x$	proud na uzlu X [A]
$I_y$	proud na uzlu Y [A]
$I_z$	proud na uzlu Z [A]
$v_i$	vstupní signál do brány Y
$v_{id}$	vstupní diferenční signál
$v_{ic}$	průměr dvou vstupních diferenčních signálů
$v_o$	výstupní signál
$f_m$	mezní kmitočet [Hz]
$K_u$	napěťový přenos
$K_i$	proudový přenos
$p$	Laplaceův operátor
$\omega_0$	úhlová frekvence [ $s^{-1}$ ]
$Q$	činitel jakosti [-]
DP/LP	Dolní propust (Low-Pass)
HP/HP	Horní propust (High-Pass)
PP/BP	Pásmová propust (Band-Pass)
PZ/BR	Pásmová zádrž (Band-Reject)

FČ/AP	Fázovací člunek (All-Pass)
R	rezistor [ $\Omega$ ]
C	kondenzátor [F]
OZ	Opereční zesilovač
UCC	univerzální proudový konvektor ( universal current conveyor)
GCC	obecní proudový konvektor (general currnet conveyor)
DVCC	diferenční proudový konvektor (differential current voltage conveyor)
DDCC	diferenční rozdílový proudový konvektor (differential difference current conveyor)
CCII	proudový konvektor druhé generace
Y	Vstupní svorka konvektoru
X	Vstupní svorka konvektoru
Z+	Výstupní svorka konvektoru
Z-	Výtupní svorka konvektoru

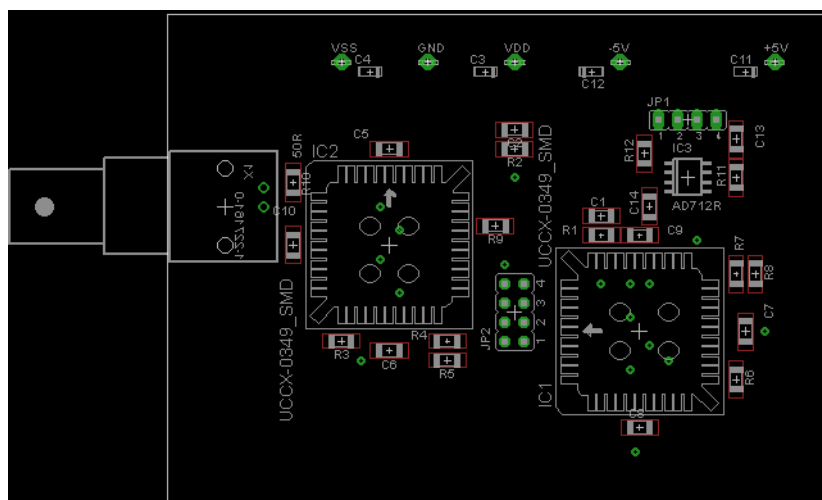
## Příloha A - Provedení a osazení kmitočtového filtru spolu s převodníky



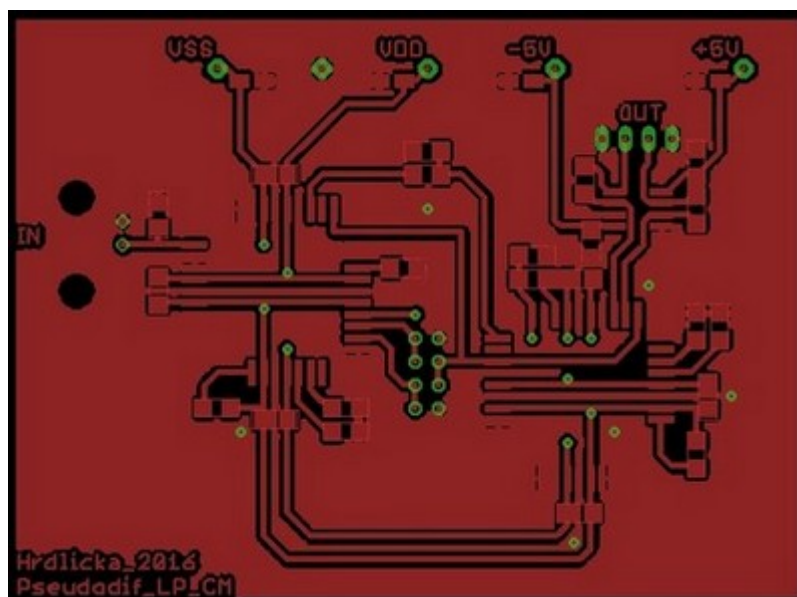
Obr. 1: Návrh desky plošných spojů - pohled ze zdola



Obr. 2: Foto desky kmitočtového filtru



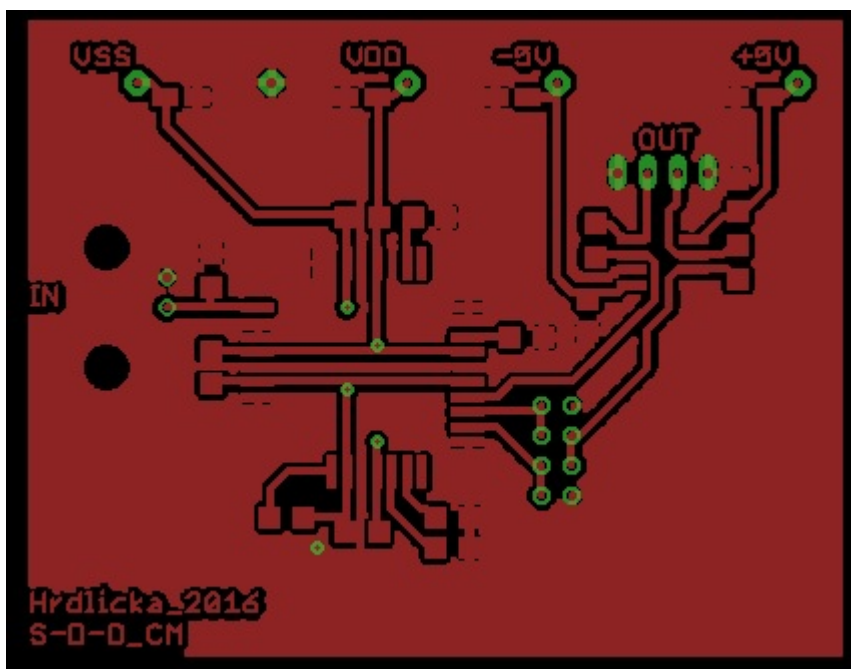
Obr. 3: Návrh desky plošných spojů - součástky



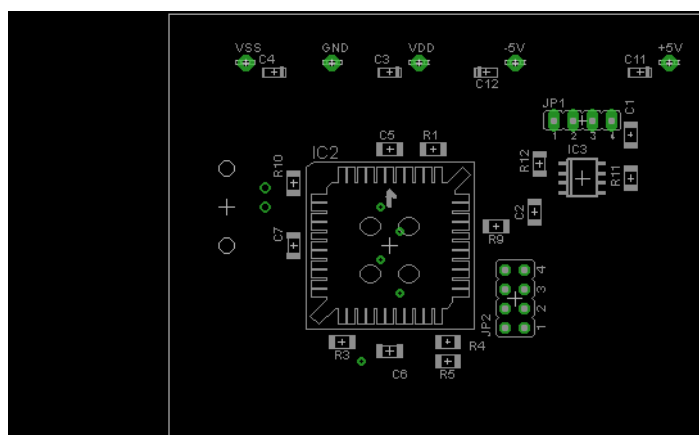
Obr. 4: Návrh desky plošných spojů - pohled ze shora

## Příloha B - Návrh kalibrační desky





Obr. 5: Návrh desky plošných spojů - pohled ze shora



Obr. 6: Návrh desky plošných spojů - součástky

Příloha C - Originální výsledky získané z obvodového analyzátoru



Obr. 7: Výsledek dolní propusti z analyzátoru



Obr. 8: Výsledek dolní propusti z analyzátoru s potlačením souhlasného signálu